第 37 卷第 14 期 2017 年 7 月 | 生 态 学 报 ACTA ECOLOGICA SINICA | Vol.37,No.14 Jul.,2017

DOI: 10.5846/stxb201604250784

向元彬,周世兴,肖永翔,胡庭兴,涂利华,黄从德.模拟氮沉降和降雨量改变对华西雨屏区常绿阔叶林土壤有机碳的影响.生态学报,2017,37(14):4686-4695.

Xiang Y B, Zhou S X, Xiao Y X, Hu T X, Tu L H, Huang C D.Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation changes on soil organic carbon in an evergreen broad-leaved forest that is part of the Rainy Area of Western China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(14):4686-4695.

模拟氮沉降和降雨量改变对华西雨屏区常绿阔叶林土壤有机碳的影响

向元彬,周世兴,肖永翔,胡庭兴,涂利华,黄从德*

四川农业大学林学院,四川省林业生态工程省级重点实验室,成都 611130

摘要:从 2013 年 11 月至 2015 年 12 月,通过原位试验,在华西雨屏区常绿阔叶林内设置了对照(CK)、氮沉降(N)、减雨(R)、增雨(A)、氮沉降+减雨(NR)、氮沉降+增雨(NA)6 个处理水平,研究了模拟氮沉降和降雨量改变对常绿阔叶林土壤有机碳的影响。结果表明:华西雨屏区常绿阔叶林土壤各土层有机碳含量表现为夏季较高,春冬季较低,0—10 cm 土层有机碳含量高于 10—20 cm 土层。从各处理土壤有机碳含量的平均值来看,0—10 cm 土层土壤有机碳含量高低顺序表现为:R<NR<CK<A<N<NA;10—20 cm 土层表现为:R<NR<A<CK<NA<N。模拟氮沉降和增雨处理促进了华西雨屏区常绿阔叶林土壤有机碳的累积,模拟减雨抑制了土壤有机碳的累积。常绿阔叶林 0—10cm 土层土壤 C/N 值显著高于 10—20 cm,土壤 C/N 值随土层加深而呈现出增加的趋势,降雨使土壤 C/N 降低,增雨使土壤 C/N 增高。同一氮沉降条件下,增雨处理增加了土壤有机碳的含量,减雨处理减少了土壤有机碳的含量;同一降雨条件下,氮沉降增加土壤有机碳的含量。氮沉降和降雨对土壤可溶解性有机碳和微生物生物量碳含量产生显著影响($P<0.05$),对土壤活性碳含量影响不显著($P>0.05$);其交互作用对土壤有机碳、可溶解性有机碳、微生物生物量碳和活性碳含量影响不显著($P>0.05$)。

关键词:氮沉降;降雨量改变;土壤有机碳;常绿阔叶林

Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation changes on soil organic carbon in an evergreen broad-leaved forest that is part of the Rainy Area of Western China

XIANG Yuanbin, ZHOU Shixing, XIAO Yongxiang, HU Tingxing, TU Lihua, HUANG Congde*

College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Laboratory of Forestry Ecology Engineering, the Provincial Key laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, *China*

Abstract: To understand the effects of nitrogen deposition and precipitation changes and their interaction on soil organic carbon, an experiment was conducted in situ within the Rainy Area of Western China in an evergreen broad-leaved forest from November 2013 to December 2015. The study had six treatments: a control (CK), nitrogen deposition (N), water reduction (R), water addition (A), nitrogen deposition×water reduction (NR), and nitrogen deposition × water addition (NA). The results revealed that the soil organic carbon contents in the different soil layers were high in summer and fall, but low in spring and winter. The soil organic carbon content was higher in the 0-10 cm soil layer than in the 10-20 cm soil layer. The average soil organic carbon content followed the order: R<NR<CK<A<N<NA in the 0-10 cm soil layer and R<NR<A<CK<NA<N in the 10-20 cm soil layer. Simulated nitrogen deposition and water addition promoted soil organic

基金项目:国家"十二五"科技支撑项目(2010BACO1A11);国家自然科学基金项目(31300522)

收稿日期:2016-04-25; **修订日期**:2016-09-09

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: lyyxq100@ aliyun.com

carbon accumulation, but water reduction inhibited it. The soil C/N ratio for the 0—10 cm soil layer was significantly higher than for the 10—20 cm layer and showed a rising trend as soil depth increased. Water reduction reduced the soil C/N ratio, but water addition increased the ratio and soil total organic carbon (TOC) content. However, water reduction reduced the soil TOC content under the same simulated nitrogen deposition conditions. Simulated nitrogen deposition increased soil TOC under the same rainfall conditions. Furthermore, nitrogen deposition and precipitation changes had significant effects on the soil extractable dissolved organic carbon (DOC) and microbial biomass carbon (MBC) ($P < 0.05$) contents, but their effect on soil labile carbon (LC) was not significant ($P > 0.05$); and the interaction between nitrogen deposition and precipitation changes did not have a significant effect on the soil TOC, DOC, MBC, and LC contents ($P > 0.05$).

Key Words: nitrogen deposition; precipitation change; soil organic carbon; evergreen broad-leaved forest

全球土壤有机碳是碳循环的重要碳库,约为 1.55×10^{12} t,是大气碳库的 3 倍[1-2]。土壤有机碳是营养元素生物地球化学循环的主要组成部分,也是土壤质量评价和土地可持续利用管理中必须考虑的重要指标[3-4]。有机碳库微小的变化都会引起与大气碳库之间交换量的巨大变化,对全球气候变化和碳平衡产生重大的影响[5]。

目前,人类活动制造的活性氮已经超过了自然陆地过程制造的活性氮[6]。活性氮主要通过湿沉降和干沉降两种方式沉降陆地和海洋,氮沉降量随着大气中的活性氮的不断增加而升高[7]。大气氮沉降的持续增加将改变有机碳输入与分解矿化过程的动态平衡,从而影响土壤有机碳库[8]。近几十年里全球的降水格局发生了很大的变化,而且降雨量的改变是不平衡的,并且季节变化较大[9-10]。全球降雨量以每 10 年 0.5%—1%的速度在增加,北半球亚热带陆地地区每 10 年减少约 0.3%,大部分中、高纬地区降水量每 10 年增加 0.5%—1.0%[11]。降水的变化会影响植物生长和土壤含水量,改变森林凋落物的输入和土壤呼吸速率,进而影响森林土壤有机碳贮藏[12]。氮沉降的持续增加和降雨量的改变势必会对森林生态系统过程造成影响。所以,研究推测氮沉降和降雨量的改变可能会影响或改变森林土壤有机碳库。影响土壤有机碳的生态因子众多,土壤有机碳含量受温度条件、水分状况、土壤微生物、土壤酶、土壤性质等因素的影响,其影响的生态因子众多[13]。而氮沉降和降雨都是影响有机碳矿化的重要因子,目前的研究忽视了氮沉降和降雨的交互作用对土壤有机碳的影响或改变。因此,研究氮沉降和降雨量改变对森林生态系统中土壤有机碳影响,对了解氮沉降和降雨量改变对森林生态系统地下生态过程的影响有及其重要的意义。

华西雨屏区处于东部季风区和青藏高原气候区的过渡地带,受东亚季风和印度季风的影响形成四川盆地西部一个多雨的狭长地带[14],属北半球中底纬度,降雨总量有增加的趋势,但局部降雨具有不平衡性[9]。该地区氮沉降主要以湿沉降为主,年总 N 沉降量已经达到 8.24—14.75 g/m^2,已经超出了该地区氮沉降临界负荷值,并有逐年上升的趋势[15]。本研究以华西雨屏区常绿阔叶林为研究对象,通过野外原位试验,研究模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区常绿阔叶林有机碳的影响,探讨氮沉降、降雨以及其交互作用对有机碳的影响和内在机制,旨在氮沉降持续增加和全球气候变化的背景下,为该区域森林生态系统可持续发展和科学管理提供基础数据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

研究区位于四川省雅安市雨城区碧峰峡(102°90′E, 29°40′N)内,海拔高度为 977.62 m,≥10℃年积温 5231℃,年均气温为 16.2 ℃,最冷月为 1 月,平均气温 6.1℃,最热月为 7 月,平均气温 25.4℃,全年地面均温 18.1℃。年日照时数为 1039.6 h,全年太阳辐射总量为 3640.13 MJ/cm^2。无霜期为 304 d,年平均降水量 1772.2 mm,实验区为地带性的偏湿性亚热带常绿阔叶林,属亚热带湿润季风型山地气候。实验区内植物种类丰富,群落结构复杂。主要有木荷(*Schima superba*)、海桐(*Pittosporum tobira*)、硬斗石栎(*Lithocarpus hancei*)、润楠(*Machilus pingii*)、总状山矾(*Symplocos botryantha*)、柃木(*Eurya japonica*)、青榨槭(*Acer davidii*)、

大叶石栎(*Lithocarpus megalophyllus*)、野漆(*Rhus succedanea*)、深裂中华槭(*Acer sinense*)、利川润楠(*Machilus lichuanensis*)、肉桂(*Cinnamomum cassia*)和山茶(*Camellia japonica*)等。土壤类型以黄壤为主,土壤厚度大于60 cm,林地条件基本一致。

1.2 样地设置

2013 年 10 月在实验地内选取未被破坏的、具有代表性的林地建立 18 个 3 m×3 m 的样方进行编号,每个样方间设>3 m 的缓冲带。试验设置氮沉降和降水 2 个因素,共 6 种处理(表 1),即对照(CK)、氮沉降 15 g N m^{-2} a^{-1}(N)、减雨 10% (R)、增雨 10% (A)、氮沉降 15 g N m^{-2} a^{-1}+减雨 10% (NR)、氮沉降 15 g N m^{-2} a^{-1}+增雨 10% (NA),每种处理重复 3 次,共 18 个处理。各样方四周用 PVC 板材围起,将 PVC 板插入地面 15 cm,用于阻止地表径 流的流入,但不 影响深层土壤的水分交流。

表 1 模拟氮沉降和降雨交互作用试验方案

Table 1 Experiment scheme of simulated nitrogen deposition and precipitation changes interaction

氮沉降水平 N itrogen level /(g m^{-2} a^{-1})	降雨水平 Precipitation level (%/a)		
	+10%(A)	0	-10%(R)
0	A(3)	CK(3)	R(3)
15(N)	NA(3)	N(3)	NR(3)

CK: 对照处理 Comparison, N: 氮沉降处理 Nitrogen deposition, R: 减雨处理 Water reduction, A: 增雨处理 Water addition, NR: 氮沉降+减雨处理 Nitrogen deposition and water reduction, NA: 氮沉降+增雨处理 Nitrogen deposition and water addition

1.3 氮沉降和降雨量改变模拟

用 NH_4NO_3 和清水进行模拟氮沉降和降雨处理。将年降雨量、施氮量平均分成 24 等分,从 2013 年 11 月 10 日至 2015 年 12 月 25 日,每 15 d 进行 1 次处理,施氮的方法是将每个样方所需 NH_4NO_3 溶解在 2 L 水中,用手提式喷雾器在林地样方 50 cm 高度来回均匀喷洒,非施氮处理样方喷施 2 L 水。降雨量按试验区近年来平均降雨量 1772 mm 计算,增加 10%的降雨量为每年增加 177.2 mm 的降雨量;减水使用自制的减雨架进行模拟减水,减雨架遮挡面积为减水样方面积的 10%。减雨架上端离地 120—140 cm 处,用 5 cm 宽的瓦面状透明 PVC 板凹槽搭建相应面积的挡雨面,并均匀分布在减雨架上面,形成减水的处理。增水用喷雾器在林地样方 50 cm 高度来回均匀喷洒相应的清水量,形成增水处理。

1.4 样品采集与指标测定

从 2014 年 3 月起,每个季度采集土样 1 次,即 2014 年 3 月、6 月、9 月、12 月和 2015 年 3 月、6 月、9 月、12 月年,共 8 次。取样时,去除地表的凋落物层,然后用 100 cm^3 环刀在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层采样,每层分 5 点采样组成一个混合土样,每个处理样方 0—10 cm 和 10—20 cm 土层各采集 3 个混合土样后分为两份。测定土壤总有机碳(TOC)、土壤可溶性有机碳(DOC)、土壤微生物生物量碳(MBC)、土壤活性碳(LC)、全氮(TN)和土壤容重等理化指标。

1.5 土壤样品分析

用环刀法测定土壤容重;用重铬酸钾氧化 -外加热法(LY/T 1237—1999) 测定土壤总有机碳含量;用半微量凯氏法测定全氮;用氯仿熏蒸提取法测定土壤微生物生物量碳;用 0.5 mol/L 硫酸钾提取,过 0.45 μm 微孔滤膜后用总有机碳分析仪测定土壤可溶解性有机碳;用 0.333 mol/L 高锰酸钾氧化法测定土壤活性碳。

1.6 数据处理

土壤碳储量的计算公式为: $T_i = N_i \times D_i \times H_i / 100$, 式中 T_i 为土壤碳储量(kg/m^2), N_i 为土壤有机碳含量(‰); D_i 为土壤容重(g/cm^3); H_i 为土层厚度(cm); 100 为换算系数[15]。

数据采 用 Excel 2003 软件进行制图,相关指标的 差异性显著 检验及回归分析采用 SPSS 13.0 统计软件进行。

2　结果与分析

2.1　模拟氮沉降和降雨量改变对常绿阔叶林土壤有机碳的影响

对照(CK)代表了自然条件下实验地的土壤有机碳的季节变化动态,各土层表现为夏秋季有机碳含量较高,春冬季含量较低,0—10 cm 土层有机碳含量高于 10—20 cm 土层。华西雨屏区常绿阔叶林 0—10 cm 和 10—20 cm 土层总有机碳含量分别介于 17.85—20.16 g/kg 和 14.54—16.84 g/kg 之间。

各处理的有机碳含量的季节变化动态和 CK 表现出相同趋势(图 1),同一处理同一土层的土壤有机碳含量波动范围较小,变化相对稳定。从各处理土壤有机碳含量的平均值来看,0—10 cm 土层有机碳含量分别为 18.82 g/kg(CK)、18.55 g/kg(R)、19.40 g/kg (A)、19.63 g/kg (N)、18.77 g/kg (NR)和 19.79 g/kg (NA),大小顺序表现为 R<NR<CK<A<N<NA;10—20cm 土层有机碳含量分别为 15.51 g/kg (CK)、15.01 g/kg (R)、15.49 g/kg (A)、15.98 g/kg (N)、15.44 g/kg (NR)和 15.88 g/kg (NA),大小顺序表现为 R<NR<A<CK<NA<N。总体来看,模拟氮沉降和增雨促进了华西雨屏区常绿阔叶林土壤有机碳的累积,减雨抑制了常绿阔叶林土壤有机碳的累积。

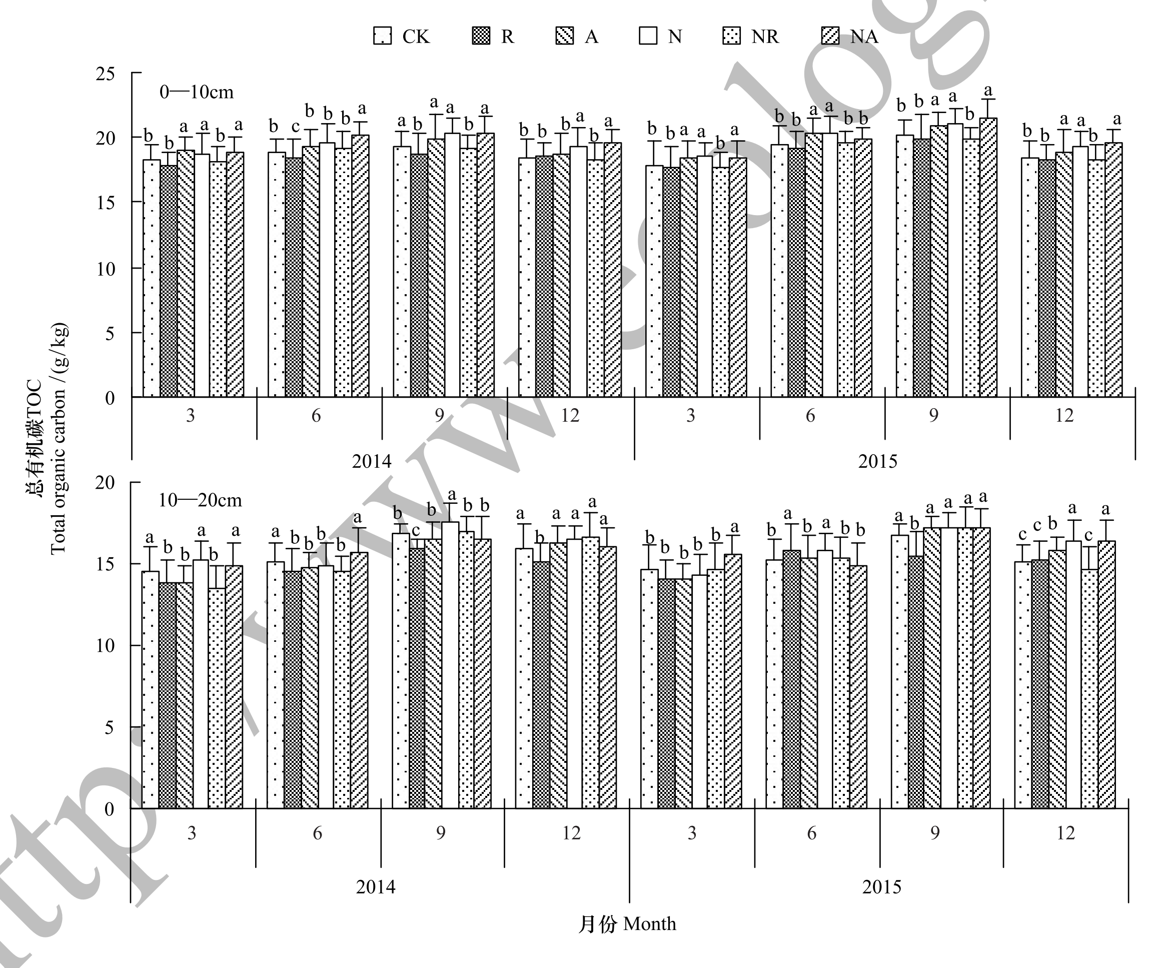


图 1　各处理不同土层土壤有机碳含量的动态变化

Fig.1　The change of soil total organic carbon content in different depth of soil under different treatments

CK: 对照处理 Comparison, N: 氮沉降处理 Nitrogen deposition, R: 减雨处理 Water reduction, A: 增雨处理 Water addition, NR: 氮沉降+减雨处理 Nitrogen deposition and water reduction, NA: 氮沉降+增雨处理 Nitrogen deposition and water addition;图柱上不同字母表示差异显著($P<0.05$, $n=3$)

2.2　模拟氮沉降和降雨改变对常绿阔叶林土壤活性碳的影响

试验结果表明,土壤DOC、MBC和LC与土壤有机碳的季节变化动态变化趋势相似(图2),表现为夏秋季

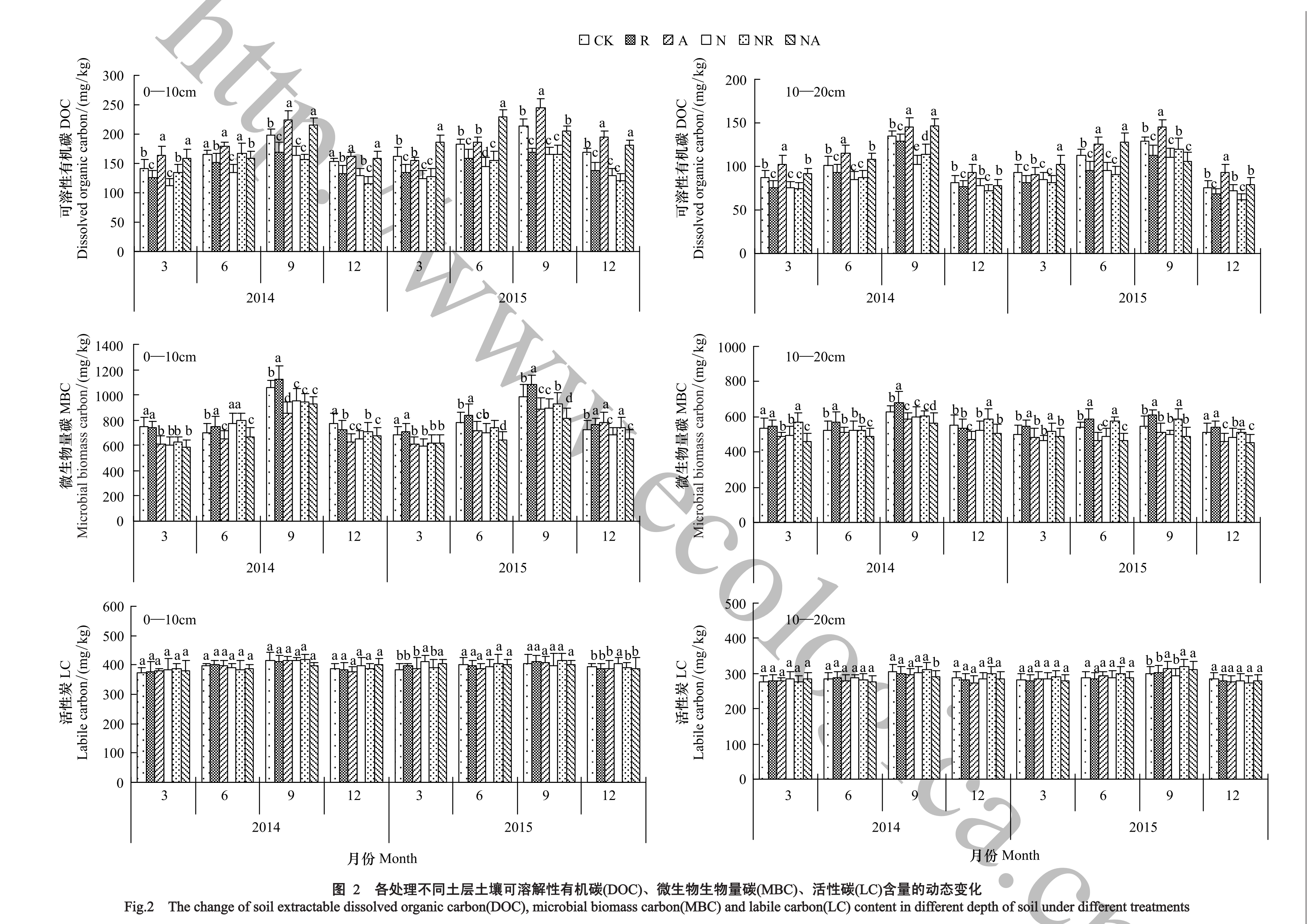


图 2 各处理不同土层土壤可溶解性有机碳(DOC)、微生物生物量碳(MBC)、活性碳(LC)含量的动态变化

Fig.2 The change of soil extractable dissolved organic carbon(DOC), microbial biomass carbon(MBC) and labile carbon(LC) content in different depth of soil under different treatments

含量较高,春冬季含量较低,并且 0—10 cm 土壤 DOC、MBC 和 LC 含量高于 10—20 cm 土层。在 0—10 cm 土层,R、A、N、NR 和 NA 处理土壤可溶性有机碳平均值比 CK 分别增加了-14.84%、8.94%、-20.41%、-17.50% 和 7.71%,微生物生物量碳平均值比 CK 增加了 4.31%、-11.06%、-9.24%、-5.53%和-13.60%,活性碳平均值比 CK 增加了 0.14%、-0.84%、1.16%、0.54%和 0.02%;在 10—20 cm 土层,R、A、N、NR 和 NA 处理土壤可溶性有机碳平均值比 CK 分别增加了-10.04%、11.90%、-13.39%、-13.70%和 3.18%,微生物生物量碳平均值比 CK 增加了 6.08%、-8.66%、-6.24%、2.69%和-10.20%,活性碳平均值比 CK 增加了-0.64%、-0.16%、0.07%、1.99%和-0.51%。可见,模拟氮沉降和降雨量改变对华西雨屏区常绿阔叶林土壤可溶性有机碳和微生物生物量碳的影响较大,而对土壤活性碳的影响较小。

2.3　模拟氮沉降和降雨量改变对常绿阔叶林土壤碳储量的影响

模拟氮沉降和降雨 21 个月后,0—20 cm 土层各形态碳储量由图 3 可知,氮沉降处理使土壤总有机碳储量增加了 4.12%,使可溶解性有机碳和微生物生物量碳储量分别降低了 19.56%和 8.79%。减雨处理使土壤总有机碳和可溶解性有机碳储量分别降低了 4.15%和 17.95%,使土壤微生物生物量碳储量增加了 10.54%。增雨处理使土壤总有机碳和可溶解性有机碳储量分别增加了 3.28%和 14.07%,土壤微生物生物量碳储量减少了 8.51%。而土壤活性碳储量对模拟氮沉降和降雨处理的反应不敏感,各处理间差异不显著(P>0.05)。

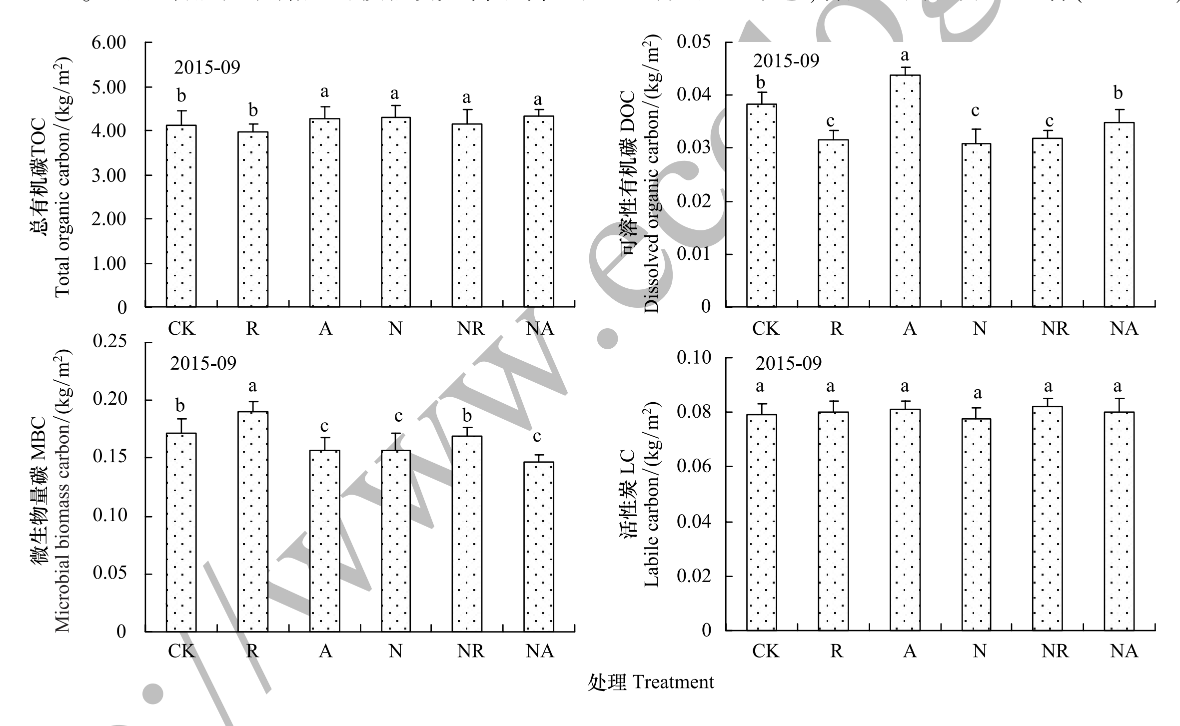


图 3　模拟氮沉降和降雨对 0—20 cm 土壤有机碳储量的影响

Fig.3　Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation changes on soil organic carbon storage in 0—20 cm soil layer

2.4　模拟氮沉降和降雨量改变对土壤 C/N 的影响

由图 4 可知,除 R 处理外,其余处理的 0—10 cm 土层土壤 C/N 值显著高于 10—20 cm,土壤 C/N 值随土层加深而呈现出增加的趋势。模拟氮沉降和降雨处理 2 a 后,0—10 cm 土层 C/N 大小顺序为:R>A>CK>NA>N>NR;10—20 cm 土层 C/N 大小顺序为:A>CK>R>NA>N>NR。总体来看,模拟氮沉降使土壤 C/N 降低,减雨和增雨处理对土壤 C/N 的影响较小。同一氮沉降条件下,降雨使土壤 C/N 降低,增雨使土壤 C/N 增高;同一降雨条件下,氮沉降使土壤 C/N 降低。

2.5　模拟氮沉降和降雨量改变对土壤活性碳的交互作用

在模拟氮沉降和降雨的交互作用下,总体看来,同一氮沉降条件下,增雨处理增加了土壤 TOC 的含量,减雨处理减少了土壤 TOC 的含量;同一降雨条件下,氮沉降增加土壤 TOC 的含量。土壤活性有机碳重复双因素

方差分析表明(表 2),0—10 cm 土层中,氮沉降对 TOC、DOC 和 MBC 含量产生显著影响($P<0.05$),对 LC 含量影响不显著($P>0.05$);降雨对 DOC 和 MBC 含量产生显著影响($P<0.05$),对 TOC 和 LC 含量影响不显著($P>0.05$)。10—20 cm 土层中,氮沉降对 DOC 和 MBC 含量产生显著影响($P<0.05$),对 TOC 和 LC 含量影响不显著($P>0.05$);降雨对 TOC、DOC、MBC 和 LC 含量影响不显著($P>0.05$)。各土层中,氮沉降和降雨的交互作用对 TOC、DOC、MBC 和 LC 含量影响不显著($P>0.05$)。

图 4 模拟氮沉降和降雨对土壤碳氮比的影响

Fig.4 Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation changes on C/N soil layers

不同大写字母代表不同处理间的差异显著($P<0.05$, $n=3$),不同小写字母代表不同土层间的差异显著($P<0.05$, $n=3$)

3 讨论

3.1 华西雨屏区常绿阔叶林土壤有机碳含量特征

土壤有机碳含量是气候、植被覆盖和管理等因素影响下土壤有机碳输 入与输出之间平 衡的结果。本研究表明,随着土壤深度的增加土壤总有机碳含量减少。原因可能是土壤微生物区系的分布以及凋落物分解过程中有机质进入土壤的次序,表层土中微生物数量较多,下层 土壤中微生物数量较少;深层土壤有机碳的来源主要 靠表层土壤 中有机碳的向下迁移,导 致表层土壤中土壤总有机碳含量较高[16-17]。试验期间,各土层土壤总有机碳的变化幅度较小,表明土壤总有机碳处于相对稳定状态,这与肖复明等[18]、向元彬等[4]的研究结果一致。

表 2 土壤有机碳重复双因素方差分析

Table 2 Two factor variance analysis of soil organic carbon

土壤有机碳 Soil organic carbon	土层 Soil layer/cm	源 Source	Ⅲ型平方和 Type Ⅲ sum of squares	均方 Mean square	*F*	*Sig.*
土壤总有机碳 TOC soil total organic carbon	0—10	氮沉降	6.986	3.493	5.102	0.010
		降雨	2.684	2.684	3.920	0.054
		氮沉降×降雨	0.736	0.368	0.538	0.588
	10—20	氮沉降	2.595	1.298	1.182	0.317
		降雨	2.227	2.227	2.029	0.162
		氮沉降×降雨	0.012	0.006	0.005	0.995
土壤可溶解性有机碳 DOC soil extractable dissolved organic carbon	0—10	氮沉降	15667.422	7833.711	13.750	0.000
		降雨	2364.055	2364.055	4.149	0.048
		氮沉降×降雨	2741.728	1370.864	2.406	0.102
	10—20	氮沉降	3347.145	1673.573	3.886	0.028
		降雨	916.127	916.127	2.127	0.152
		氮沉降×降雨	196.462	98.231	0.228	0.797
土壤微生物生物量碳 MBC soil microbial biomass carbon	0—10	氮沉降	74097.401	37048.700	2.116	0.000
		降雨	40692.871	40692.871	2.324	0.025
		氮沉降×降雨	8583.083	4291.542	.245	0.784
	10—20	氮沉降	45221.930	22610.965	13.859	0.000
		降雨	4922.168	4922.168	3.017	0.090
		氮沉降×降雨	1325.425	662.712	0.406	0.669
土壤活性碳 LC soil labile carbon	0—10	氮沉降	131.968	65.984	0.441	0.646
		降雨	121.508	121.508	0.812	0.373
		氮沉降×降雨	18.112	9.056	0.061	0.941
	10—20	氮沉降	68.950	34.475	0.264	0.769
		降雨	61.314	61.314	0.470	0.497
		氮沉降×降雨	172.894	86.447	0.663	0.521

3.2　模拟氮沉降和降雨量改变对活性碳库的影响

目前,氮沉降对土壤有机碳影响的主要表现有促进作用、抑制作用或者无明显影响[19-22]。本研究表明,模拟氮沉降在一定程度上使各土层中土壤总有机碳含量增加,促进了有机碳的积累。与模拟氮沉降对杉木人工林土壤有机碳的影响和施氮对杨树人工林土壤有机碳的影响的研究结果一致[23-24]。有效氮增加的情况下,植物的光合产物分配可能改变,导致根冠比减少,使根生物量减少,从而减少根系凋落物和分泌物进入土壤中的量[15],另外,氮沉降可能会抑制土壤有机质分解矿化促进土壤有机碳积累。DOC 和 MBC 在很大程度上决定于土壤 TOC 的含量,而且 DOC 和 TOC 常又处于动态平衡之中,可以在一定条件下相互转化[25-26]。DOC 是凋落物分解和淋溶的产物[15],因此,氮沉降对 DOC 的影响可能通过改变凋落物的分解速率产生影响。研究表明,氮沉降降低了土壤 DOC 的含量,与涂利华等[15]对慈竹林的研究结果一致。研究还表明,氮沉降降低了凋落物的分解速率,凋落物分解减慢,进入土壤的碳源减少,可能会导致土壤 DOC 含量的减少。土壤中 DOC 是微生物的重要能源[27],土壤中 DOC 的含量可能会影响土壤微生物量。研究表明模拟氮沉降降低了土壤 MBC 的含量,模拟氮沉降样方的土壤 pH 值减小,导致土壤酸化。有研究表明,土壤 pH 值下降后,尽管土壤有机质含量有所增加,但是不易被土壤微生物利用,因而造成了土壤微生物量减少和土壤微生物群落结构的改变[28]。因此,氮沉降增加造成的土壤酸化很可能是调控土壤微生物量的主要因素。

降雨对土壤有机碳库的影响是通过以下两个方面实现的,一方面是通过改变土壤水分含量,二是通过降雨的淋溶作用。水分是土壤有机碳输入和分解过程中起作用的主要气候因子之一[29]。本研究表明,降雨增加使土壤有机碳和 DOC 含量增加,降雨减少处理使土壤 TOC 和 DOC 含量减少;而降雨增加使土壤 MBC 含量减少,降雨减少使土壤 MBC 含量增加。研究表明,陆地土壤碳密度一般随降水的增加而增加[12]。土壤的水分条件通过影响土壤的通气性而影响土壤固有有机碳的矿化分解和外源有机碳的降解,进而影响土壤持有的有机碳量。土壤水分充足,则其透气性差,原有机碳不易矿化,外源有机残体在水分作用下易于腐烂降解成小分子有机物质,保存于土壤中,从而有利于土壤有机碳含量的提高;土壤水分不足,土壤孔隙度大,利于有机碳的矿化分解,不利于土壤有机碳的积累[12]。降雨会改变了植物根系生物量、微生物的繁殖速度以及活性、土壤水势和微生物对底物的利用,从而改变了土壤微生物生物量 C、N 含量[30]。

LC 是土壤碳库质量和稳定性的重要指标之一[31]。本研究表明,模拟氮沉降和降雨对各土层中的 LC 含量的影响较小,氮沉降和 CK 处理间差异不显著(P>0.05),表明本研究氮沉降和降雨处理对华西雨屏区常绿阔叶林土壤碳库的稳定性并未造成显著影响。

3.3　模拟氮沉降和降雨量改变对土壤 C/N 值的影响

土壤中 C/N 值对土壤中有机质分解具有重要作用,土壤 C/N 值反映土壤有机质的矿质化和腐殖化程度,不同处理对土壤 C/N 值的影响也不同。万晓华等[32]对阔叶和杉木人工林对土壤碳氮库研究表明,两种林分 0—5 cm 和 5—10 cm 土层土壤碳氮比无显著差异。而刘爽等[33]对 5 种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局研究表明,0—10 cm 土层土壤碳氮比(16.7)显著低于 10—20 cm(20.1)。本研究表明,华西雨屏区常绿阔叶林土壤 0—10 cm 土层土壤 C/N 值显著高于 10—20 cm,土壤 C/N 值随土层加深而呈现出增加的趋势。与刘爽等[33]、Hamer 等[34]研究结果一致,原因可能是不同土层中,土壤有机碳变化幅度小,土壤全氮变化幅度大所致[35]。本研究还表明,模拟氮沉降使各土层土壤 C/N 降低,与 Nadelhoffer 等[36]研究表层土 壤的 C/N 在长期增加的氮沉 降条件下呈下降趋势的结果一致,Aber 等[37]也认为长期模拟氮沉降会使温带森林土壤 C/N 值下降。原因可能是长期的模拟氮沉降会使表层土壤中有效氮含量增加,而土壤有机碳较为稳定,从而使土壤 C/N 值降低。在某一特定土壤中,土壤 C/N 值基本上为一常数[38]。在没有外源碳和氮进入土壤的条件下,其他因素对土壤 C/N 值直接影响较小,其影响主要是通过间接影响,比如对凋落物分解、微生物数量及活性、有机质矿化速度等的影响,从而导致 C/N 值的改变。试验中减雨和增雨处理通过上述途径对土壤 C/N 值产生影响,减雨使微生物数量增加,但使凋落物分解速率降低,而增雨使凋落物分解速率增加,但同时会使氮素和碳素流失。因此,本研究中减雨和增雨处理对土壤 C/N 值的影响较小。

3.4 模拟氮沉降和降雨量改变对土壤活性碳影响的交互作用

模拟氮沉降和降雨交互作用下,总体看来,同一氮沉降条件下,增雨处理增加了土壤 TOC 的含量,减雨处理减少了土壤 TOC 的含量;同一降雨条件下,氮沉降增加土壤 TOC 的含量。土壤活性有机碳重复双因素方差分析表明,氮沉降和降雨对 DOC 和 MBC 含量产生显著影响($P<0.05$),对 LC 含量影响不显著($P>0.05$);其交互作用对 TOC、DOC、MBC 和 LC 含量影响不显著($P>0.05$)。模拟氮沉降和降雨对其的交互作用包含了许多物理生物化学反应,并受凋落量大小、凋落物分解快慢、微生物数量及活性等的影响等其他因素的影响,而其产生的效应是综合各种因素的共同结果,其机理有待进一步深入研究。

参考文献(References):

[1] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European Journal of Soil Science, 1996, 47(2): 151-163.

[2] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. Global Change Biology, 2000, 6(3): 317-327.

[3] Duiker S W, Lai R. Crop residue and tillage effects on carbon sequestration in a Luvisol in central Ohio. Soil and Tillage Research, 1999, 52(1/2): 73-81.

[4] 向元彬, 黄从德, 胡庭兴, 涂利华, 李仁洪, 颜震, 普梅. 不同密度巨桉人工林土壤有机碳及微生物量碳氮特征. 西北植物学报, 2014, 34(7): 1476-1481.

[5] 欧阳学军, 周国逸, 魏识广, 黄忠良, 李炯, 张德强. 南亚热带森林植被恢复演替序列的土壤有机碳氮矿化. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1688-1694.

[6] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, Boyer E W, Howarth R W, Seitzinger S P, Asner G P, Cleveland C C, Green P A, Holland E A, Karl D M, Michaels A F, Porter J H, Townsend A R, Vöosmarty C J. Nitrogen cycles: past, present, and future. Biogeochemistry, 2004, 70(2): 153-226.

[7] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, Likens G E, Matson P A, Schindler D W, Schlesinger W H, Tilman D G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. Ecological Applications, 1997, 7(3): 737-750.

[8] Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems-recent progress and challenges. Global Change Biology, 2006, 12(2): 141-153.

[9] IPCC. Climate Change: The IPCC Scientific Assessments. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

[10] 张金屯. 全球气候变化对自然土壤碳、氮循环的影响. 地理科学, 1998, 18(5): 463-471.

[11] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.

[12] 姜勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子. 生态学杂志, 2007, 26(2): 278-285.

[13] Zheng X H, Fu C B, Xu X K, Yan X D, Huang Y, Han S H, Hu F, Chen G X. The Asian nitrogen cycle case study. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2002, 31(2): 79-87.

[14] 涂利华, 胡庭兴, 黄立华, 李仁洪, 戴洪忠, 雒守华, 向元彬. 华西雨屏区苦竹林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应. 植物生态学报, 2009, 33(4): 728-738.

[15] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 李仁洪, 何远洋, 田祥宇, 肖银龙, 景建飞. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林土壤活性有机碳库和根生物量的影响. 生态学报, 2010, 30(9): 2286-2294.

[16] 何宁, 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 杜虎, 鹿士杨, 卢凌霄. 喀斯特峰丛洼地次生林土壤有机碳的剖面分布特征. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 374-381.

[17] 张文敏, 吴明, 王蒙, 邵学新, 姜小三, 周斌. 杭州湾湿地不同植被类型下土壤有机碳及其组分分布特征. 土壤学报, 2014, 51(6): 1351-1360.

[18] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 于小军, 刘广路, 邓旺华. 毛竹林土壤有机碳及微生物量碳特征研究. 水土保持学报, 2008, 22(6): 128-131.

[19] 祁瑜, Mulder J, 段雷, 黄永梅. 模拟氮沉降对克氏针茅草原土壤有机碳的短期影响. 生态学报, 2015, 35(4): 1104-1113.

[20] Mack M C, Schuur E A G, Bret-Harte M S, Shaver G R, Chapin F S. Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization. Nature, 2004, 431(7007): 440-443.

[21] Reid J P, Adair E C, Hobbie S E, Reich P B. Biodiversity, nitrogen deposition, and CO_2 affect grassland soil carbon cycling but not storage. Ecosystems, 2012, 15(4): 580-590.

[22] Chen X M, Liu J X, Deng Q, Yan J H, Zhang D Q. Effects of elevated CO_2 and nitrogen addition on soil organic carbon fractions in a subtropical forest. Plant and Soil, 2012, 357(1/2): 25-34.

[23] 袁颖红, 樊后保, 刘文飞, 张子文, 孟庆银, 胡锋, 李辉信. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤可溶性有机碳和微生物量碳的影响. 水土保持学报, 2012, 26(2): 138-143.

[24] 许凯, 徐钰, 张梦珊, 徐长柏, 曹国华, 葛之葳, 阮宏华. 氮添加对苏北沿海杨树人工林土壤活性有机碳库的影响. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1480-1486.

[25] 齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛. 温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应. 环境科学, 2014, 35(8): 3073-3082.

[26] 陶澍, 曹军. 山地土壤表层水溶性有机物淋溶动力学模拟研究. 中国环境科学, 1996, 16(6): 410-414.

[27] Chen J S, Chiu C Y. Effect of topography on the composition of soil organic substances in a perhumid sub-tropical montane forest ecosystem in Taiwan. Geoderma, 2000, 96(1/2): 19-30.

[28] Wang H, Mo J M, Lu X K, Xue J H, Li J, Fang Y T. Effects of elevated nitrogen deposition on soil microbial biomass carbon in major subtropical forests of southern China. Frontiers of Forestry in China, 2009, 4(1): 21-27.

[29] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.

[30] 向元彬, 黄从德, 胡庭兴, 涂利华, 杨万勤, 李仁洪, 胡畅. 华西雨屏区巨桉人工林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应. 林业科学, 2014, 50(1): 21-26.

[31] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. Crop & Pasture Science, 1995, 46(7): 1459-1466.

[32] 万晓华, 黄志群, 何宗明, 胡振宏, 杨靖宇, 余再鹏, 王民煌. 阔叶和杉木人工林对土壤碳氮库的影响比较. 应用生态学报, 2013, 24(2): 345-350.

[33] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局. 生态学报, 2010, 30(12): 3135-3143.

[34] Hamer U, Potthast K, Burneo J I, Makeschin F. Nutrient stocks and phosphorus fractions in mountain soils of Southern Ecuador after conversion of forest to pasture. Biogeochemistry, 2013, 112(1/3): 495-510.

[35] 樊后保, 袁颖红, 王强, 李燕燕, 黄荣珍. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳和全氮的影响. 福建林学院学报, 2007, 27(1): 1-6.

[36] Nadelhoffer K J, Emmett B A, Gundersen P, Kjønaas O J, Koopmans C J, Schleppi P, Tietema A, Wright R F. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. Nature, 1999, 398(6723): 145-148.

[37] Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, Magill A, Berntson G, Kamakea M, McNulty S, Currie W, Rustad L, Fernandez L. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. BioScience, 1998, 48(11): 921-934.

[38] Brady N C, Weil R R. The Nature and Properties of soils. 11th ed. Prentice Hall Inc., 1996.